

半自然退塘还林模式下红树林生态环境特征及其物种多样性动态变化分析

Analysis of Ecological Environment Characteristics and Species Diversity Dynamic Changes of Restored Mangroves under the Semi-natural Pond-to-mangrove Model

王媛 杜彦君 钟云芳 杨泽秀*

WANG Yuan, DU Yanjun, ZHONG Yunfang, YANG Zexiu*

基金项目: 海南南方黑脸琵鹭省级自然保护区2021年中央财政林业改革发展资金(湿地保护修复)项目实施方案(编号: RH2100006346); 昌江黎族自治县珠碧江河口湿地红树林生态监测项目(编号: RH2200001542)

摘要

红树林是地球上生物多样性最丰富和生产力最高的生态系统之一,是抵御台风、海啸和风暴潮等灾害的生态屏障,也是众多鱼虾蟹贝、昆虫和鸟类的重要栖息地。以海南省昌江黎族自治县珠碧江河口湿地为研究对象,于2021年5月至2023年10月开展生态环境和动植物群体调研。采用Shannon-Wiener多样性指数、Simpson多样性指数和Pielou均匀度指数进行红树林物种多样性评价,并运用Canoco 5.0进行相关性分析。结果表明:1)随着退塘还林年限的增加,水体中硝酸盐氮、活性磷酸盐含量呈下降趋势,半自然退塘还林模式在一定程度上改善了水环境质量;2)在各退塘还林阶段,底栖动物和鱼类多样性均呈现先降后升的趋势,退塘还林区物种多样性和生态系统功能得到了一定的提升;3)水体温度和沉积物pH与红树林物种多样性指数呈显著相关,在未来红树林修复过程中需给予更多关注。

Abstract

Mangroves are one of the most biodiverse and productive ecosystems on Earth, an ecological barrier against disasters such as typhoons, tsunamis and storm surges, and essential habitats for numerous fish, shrimps, crabs, shellfish, insects and birds. The Zhubijiang estuary wetland in Changjiang County, Hainan Province, was used as the study object, and the research on the ecological environment and the flora and fauna communities was carried out from May 2021 to October 2023. Mangrove species diversity was evaluated using the Shannon-Wiener index, Simpson index and Pielou evenness index, and correlation analysis was performed with Canoco 5.0. The results showed that the nitrate nitrogen and active phosphate content in the water body showed a decreasing trend with the increase of the years of pond retreat, and the semi-natural pond retreat mode improved the water environment quality to a certain extent. The diversity of benthic fauna and fish showed a decreasing and then an increasing trend at each pond retreat stage, and the species diversity and ecosystem function of the pond retreat area were improved to a certain extent. The water temperature and sediment pH were significantly correlated with the mangrove species diversity index, and more attention should be paid to the mangrove restoration process in the future.

文章亮点

1) 对珠碧江河口湿地红树林退塘还林修复前期生态环境特征及物种多样性变化进行较全面的分析;2) 初步揭示了水体温度、盐度和沉积物pH是影响红树林物种多样性的主导环境因子;3) 为河口湿地红树林生态修复提供科学参考。

关键词

退塘还林; 红树林; 生物多样性; 环境因子; 海南岛

Keywords

Pond-to-mangrove; Mangrove; Biodiversity; Environmental factor; Hainan Island

收稿日期: 2023-04-19

修回日期: 2024-05-23

红树林指自然分布于热带、亚热带海岸带和潮间带,由红树植物为主的常绿乔木、灌木组成的木本植物群落,其是海岸区域重要的湿地类型之一^[1],也是当今全球生产力最高、碳含量最高的生态系统之一^[2]。20世纪80年代以来,在全球鱼虾消费需求急剧增长、养殖塘大规模建设的背景下,红树林面积不断缩小,红树林湿地生态系统成为热带地区退化最严重的生态系统^[3],其恢复成为全球亟待解决的生态问题之一。滩涂造林的恢复方式存在造林区域有限、成活率低、不利于维持生物多样性等诸多问题^[4],退塘还林以其独特的优势成为红树林生态恢复的主要方式^[5-6]。自我国2018年全面推行退塘还林还湿工作以来,对退塘区域红树林生态系统变化的研究基本空白^[7]。现有研究表明,半自然退塘还林模式(人工辅助退塘还林模式)通过人工打开鱼塘缺口,疏通纳潮通道,恢复水文连通性后,避开退潮积水区配植适当的红树植物,可快速达到较好的恢复效果^[8]。但目前尚不明确该模式在退塘还林过程中生态环境特征的变化、生态恢复的程度和周期,以及是否具有可行性、可推广性等。

珠碧江河口湿地红树林是海南岛西部沿海地带十分重要的自然生态资源。该湿地有丰富的底栖动物和鱼类资源,也是大多数迁徙水鸟和过境候鸟的栖息地,能有效指示退塘还林恢复效果。该地于2021年进行半自然退塘还林修复,人工种植红海兰 *Rhizophora stylosa*、海榄雌 *Avicennia marina*、蜡烛果 *Aegiceras corniculatum*、榄李 *Lumnitzera racemosa* 和水黄皮 *Pongamia pinnata* 等植物,苗木规格为40~60 cm,种植间距为1.0 m×1.0 m,造林修复总面积约为0.62 km²,疏通纳潮通道约为0.07 km²。因此,珠碧江河口湿地是探究半自然退塘还林模式下红树林生态系统功能恢复情况的典型实验样地。

本研究分别在珠碧江河口湿地红树林退塘还林前半年(退塘-0.5a)、退塘还林时(退塘0a)、退塘还林后半年、一年、一年半、两年(退塘0.5a、1a、1.5a、2a)6个阶段,对退塘还林区域水质因子、沉积物因子、植被群落、底栖动物和鱼类多样性进行调查监测和对比研究,旨在为进一步探讨退塘还林机制和过程奠定理论基础,为退塘还林技术的研发提供更多的依据。同时,揭示影响红树林物种多样性的主导环境因子,为珠碧江河口湿地红树林的科学保护和修复策略的制定提供必要的技术支持。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

珠碧江河口湿地位于海南省珠碧江与南罗溪交汇处的南罗溪至新港湿地区域,退塘还林修复种植范围为南罗村-新港海岸区域,南侧以桥梁为界,北侧至小岛南缘,西侧岸线不进行生态护岸改造,东侧不包括河道与河堤(19°29'11"~19°29'48"N, 108°55'48"~108°56'32"E)。该地区属典型的热带季风性海洋气候,年平均气温24.3℃,年平均降水量1676 mm,日照充足,热量丰富^[9]。

1.2 研究方法

1.2.1 监测方法

本研究以底栖动物和鱼类作为生物指示指标,结合生态环境监测数据来分析半自然退塘还林模式下红树林生态系统功能的恢复情况。于2021年5月至2023年10月对修复区域进行为期3年共6个阶段的监测,于每年5月(春季)和10月(秋季)开展。具体监测方法如下:

1) 动物群落调查

底栖动物:在入海口(1号点)、林缘滩涂(2、3号点)、不同树种组成的林分内(4、5号点)分别选取5个底栖动物监测断面,每个断面采集5个样方,样方大小为30 cm×30 cm,深度为30 cm。采集样方框内的沉积物,用1 mm孔径筛子分选出沉积物内底栖生物并鉴定种名,使用精确度为0.01 g的电子天平测量其鲜重以计算生物量。

鱼类:采用捕捞法监测鱼类。根据不同立地条件,在入海口(1号点)、林缘滩涂(2、3号点)、红树林林内潮沟(4、5号点)分别布设5个鱼类监测点。选用当地渔民常用的地笼,又称蜈蚣网,于涨潮前布于样点,隔日退潮后起网^[10]。根据《海洋调查规范第6部分:海洋生物调查》(GB/T 12763.6-2007)的有关规定,起网后将收集的鱼类样品进行种类鉴定、计数等实验步骤。

2) 环境参数获取

植物群落:调查退塘区域的植物种类、个体数量、树高、胸径或基径等,以了解样地的红树幼苗生长情况和底栖动物、鱼类的栖息环境。根据不同群落类型的分布情况设置样地,每个样地设置3个大小为10 m×10 m的样方。

水质因子:采用现场实测结合采样测定的方法。海水酸碱度(pH)、温度、盐度(Salinity, Sal)、溶解氧(Dissolved Oxygen, DO)使用仪器现场检测;氨氮(NH₃-N)、硝酸盐氮(NO₃-N)、亚硝酸盐氮(NO₂-N)和活性磷酸盐(PO₄³⁻)含量通过采集监测点水样送实验室检测得到。

沉积物因子:采集表层0~10 cm及10~20 cm的沉积物,采样时先轻轻刮去沉积物表面,利用环刀(100 cm³)采取沉积物样品,装入自封袋,并做好标记送实验室,检测其pH、容重、盐度。

根据以上方法设计各监测样点,共设立10个植物调查样地、5个鱼类监测点、5个底栖监测断面、5处水质监测点和4处沉积物监测点(图1)。

1.2.2 数据处理与分析

1) 生物多样性分析

本研究通过在不同季节对珠碧江红树林进行实地监测调查,利用R软件^[11]计算研究区域内的Shannon-Wiener多样性指数(H')、Simpson多样性指数(D)、Pielou均匀度指数(J),测度退塘还林区底栖动物和鱼类物种多样性^[12],相关公式如下:

$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i \times \ln P_i \quad (1)$$

$$D = 1 / \sum_{i=1}^S P_i^2 \quad (2)$$

$$J=H'/\ln S \quad (3)$$

式中, S 为物种数, P_i 的数值等于物种 i 的个体数占群落中总个体数的比例。

2) 环境因子与生物因子相关性分析

分析不同退塘阶段的环境因子与底栖动物、鱼类生物指数的相关性, 有助于探究退塘还林过程中影响红树林恢复效果的因子。本研究运用 Canoco 5.0^[13] 对底栖动物、鱼类与环境因子进行冗余分析 (Redundancy Analysis, RDA), 含 8 个水质因子 (盐度、温度、溶解氧、pH、氨氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮、活性磷酸盐)、3 个沉积物因子 (盐度、pH、容重) 与 5 个生物指标 (物种数 S 、个体数 N 、Shannon-Wiener 多样性指数、Simposon 多样性指数、Pielou 均匀度指数)。

2 结果与分析

2.1 退塘还林过程中红树林生态环境特征的变化

2.1.1 植物群落特征变化

通过研究区红树植物各阶段的实地监测可以发现, 种植的红海兰、海榄雌、蜡烛果幼苗无论是高度还是茎干, 都能在短时间内展现出明显的生长态势 (表 1)。同时, 在退塘 1.5a 阶段后, 大多数红树苗木已生长出支柱根, 显示出良好的定植效果。

2.1.2 水质因子特征变化

研究区水体 pH 范围为 7.25~8.32, 温度为 25.20~37.30 °C, 盐度为 6.12‰~48.32‰, 溶解氧为 2.65~10.44 mg·L⁻¹, 氨氮范围为 0.000~1.280 mg·L⁻¹, 硝



图 1 珠碧江河口红树林监测样点

Fig.1 Mangrove monitoring sites in Zhubijiang estuary

酸盐氮为 0.005~0.501 mg·L⁻¹, 亚硝酸盐氮为 0.001~0.153 mg·L⁻¹, 活性磷酸盐为 0.017~0.208 mg·L⁻¹ (图 2)。在各退塘阶段中, 水质因子均有差异, 其中温度、盐度、溶解氧、氨氮和亚硝酸盐氮差异更显著。溶解氧在退塘 1.5a 阶段前呈不同程度的下降趋势, 在 2a 阶段时有所升高; 亚硝酸盐氮、活性磷酸盐在退塘 1.5a 阶段前波动升高, 但在 2a 阶段时有所下降并显著低于 1.5a 阶段。

2.1.3 沉积物因子特征变化

研究区 0~10 cm 土层沉积物 pH 范围为 4.18~9.21, 容重为 0.90~1.67 g·cm⁻³, 盐度为 0.10‰~16.30‰。10~20 cm 土层沉积物 pH 范围为 4.09~8.87, 容重为 1.01~1.62 g·cm⁻³, 盐度为 0.08‰~9.72‰。在各个退塘还林阶段, 沉积物 pH 总体呈升-降-升的趋势; 容重总体差异不大; 盐度呈波动上升的趋势, 且表层盐度都要高于深层盐度 (图 3)。

2.2 退塘还林过程中物种多样性的变化

底栖动物 Shannon-Wiener 多样性指数在退塘 0a 至退塘 1a 阶段均有所下降, 在退塘 1.5a、退塘 2a 阶段有所上升, 甚至在退塘 1.5a 时高于退塘前 (图 4-a), 一定程度说明半自然退塘还林修复模式速度快, 成效明显。同年监测的 Shannon-Wiener 多样性指数高值均出现在春季 (退塘 -0.5a、0.5a、1.5a 阶段), 这与东寨港红树林滩涂大型底栖动物存在季节变化的特点一致^[14], 猜测该季节变化可能跟优势种的繁殖特点有关。

鱼类 Shannon-Wiener 多样性指数在退塘后呈先降后升趋势 (图 4-b), 且在退塘 2a 阶段高于退塘 0a 阶段, 随着退塘时间的增加, 鱼类多样性得到恢复。均匀度指数在不同退塘阶段有所波动, 总体差异不大。在退塘 1.5a 阶段的调查中, 临近入海口的 1 号、2 号监测点因渔网被人为损坏未记录到物种, 故该阶段的鱼类多样性偏低。

2.3 红树林环境因子与生物因子的相关性

2.3.1 水质因子与生物因子关联分析

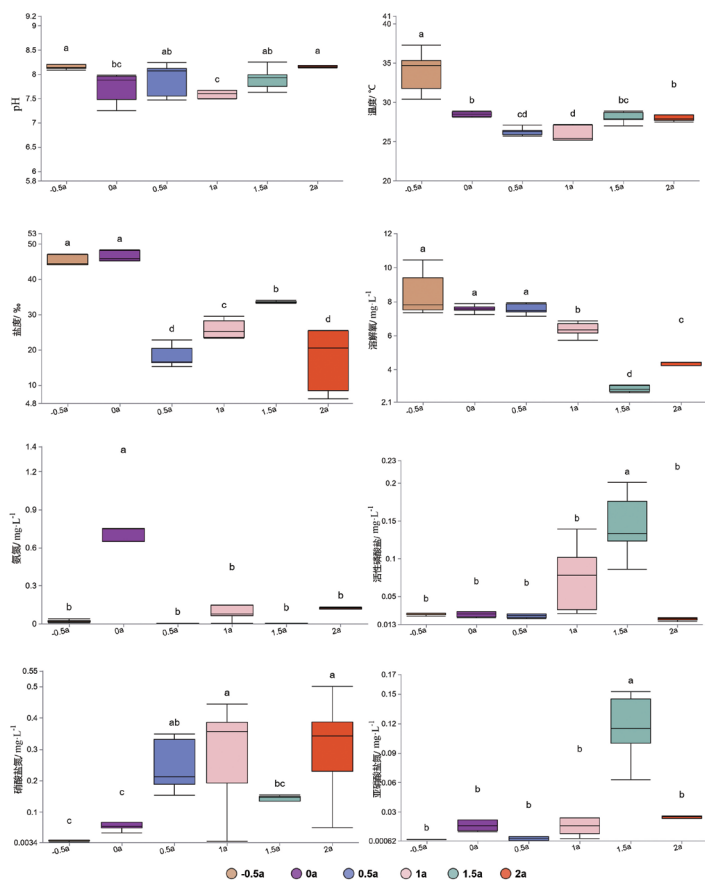
水质因子与底栖动物生物多样性的 Canoco-RDA 分析

表 1 红树植物群落特征

Tab.1 Mangrove plant community parameters

退塘阶段	植株密度 (ind/m ²)	植株高度 /cm	植株基径 /cm	主要植被类型	主要根系类型
退塘 -0.5a	-	-	-	-	-
退塘 0a	0.96±0.04	46.89±1.74	1.43±0.06	红海兰	无侧根
退塘 0.5a	0.89±0.07	50.81±3.79	1.45±0.49	红海兰、海榄雌	无侧根
退塘 1a	0.84±0.04	78.54±8.16	1.67±0.45	红海兰、海榄雌、蜡烛果	无侧根
退塘 1.5a	0.79±0.09	84.11±24.82	1.95±0.25	红海兰、海榄雌、蜡烛果	支柱根
退塘 2a	0.75±0.10	90.41±9.86	2.12±0.70	红海兰、海榄雌、蜡烛果	支柱根

注: 表中数值为平均值±标准差。



注：字母相同表示两组数据无显著差异，字母不同表示差异显著。因个别退塘阶段有离群点的存在，字母标注于离群点的位置。图3同。

图2 水质因子的变化

Fig.2 Changes of water quality factors

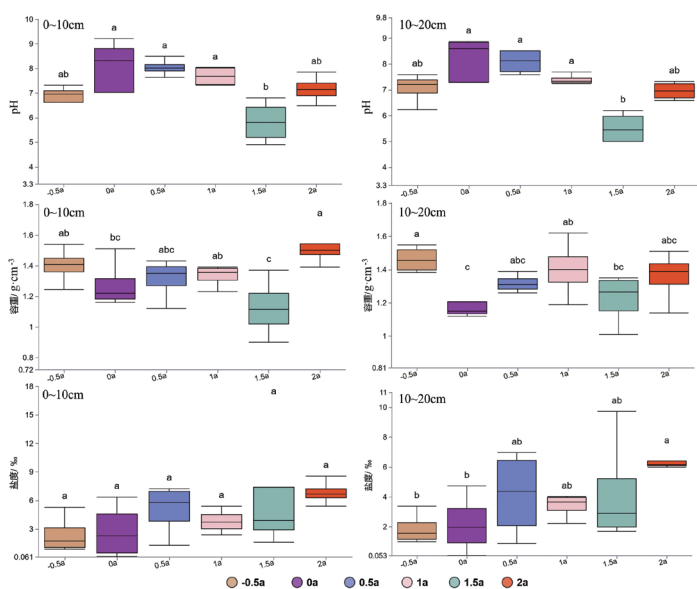


图3 沉积物因子的变化

Fig.3 Changes of sediment factors

显示(图5-a), 温度与底栖动物 Shannon-Wiener 多样性指数、物种数呈显著正相关($P<0.01$)。水质因子与鱼类生物多样性的 Canoco-RDA 分析显示(图5-b), 水体盐度与鱼类个体数、物种数呈显著正相关($P<0.01$), 温度与鱼类个体数、物种数呈显著正相关($P<0.05$), 亚硝酸盐氮含量与鱼类 Simpson 多样性指数方向趋近相反, 呈显著负相关($P<0.01$)。

2.3.2 沉积物因子与生物因子关联分析

深层沉积物 pH 与底栖动物 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数和物种数有显著相关性($P<0.05$, 图6-a)。浅层沉积物容重与鱼类物种多样性有显著相关性($P<0.01$), 深层沉积物盐度与鱼类物种多样性有显著相关性($P<0.05$, 图6-b)。

3 讨论

溶解氧含量是反映海水质量或有机物污染的主要指标之一^[15], 研究区溶解氧在退塘 2a 阶段较退塘 1.5a 阶段有所提升。陈永林等^[16]将水体 NO_3^- 、 NO_2^- 、 NH_4^+ 、 PO_4^{3-} 等指标列为水环境质量负向指标, 对广西壮族自治区北海红树林区的海域水质进行测定, 得到 NO_3^- 范围为 $0.02\sim0.31\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NO_2^- 为 $0.00\sim0.07\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NH_4^+ 为 $0.01\sim0.08\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。本研究显示, 退塘 2a 阶段硝酸盐氮、活性磷酸盐含量显著低于 1.5a 阶段。因此, 随着退塘时间的延长, 研究区水环境质量可能会有很大地改善。相关性分析结果表明, 水

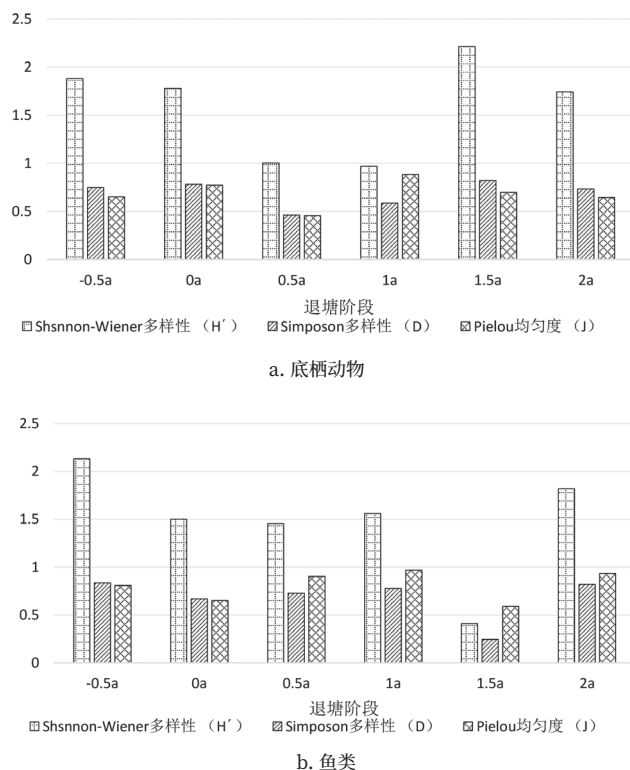


图4 底栖动物和鱼类物种多样性的变化

Fig.4 Changes of benthic fauna and fish species diversity

体温度与底栖动物、鱼类物种多样性呈显著相关,且在适宜范围内,呈正相关。根据底栖动物的生理活动和代谢速率可知,在适宜的温度范围内,温度越高,底栖动物的生长和繁殖活动通常会越旺盛,种群数量也相对较高^[17]。其次,温度对鱼类的生命周期、繁殖活动、食物链和食物供应也有直接影响,许多鱼类在特定的温度范围内才能正常繁殖和生存^[18]。

红树林湿地沉积物的理化性质如pH、养分含量及盐度等,直接或间接影响着红树林的生长状况和生态功能^[19]。本研究相关性分析结果表明,

沉积物 pH 与底栖动物多样性有显著相关性。在适宜的 pH 值范围内,底栖动物的物种多样性通常较高。这是因为适宜的酸碱度条件有利于底栖动物的生存和繁衍。然而,当沉积物 pH 值过高时,可能会对底栖动物的生存造成不利影响,导致物种多样性降低。此外,沉积物 pH 值的变化还可能影响底栖动物的分布和群落结构。不同的底栖动物对酸碱度的适应能力有所不同,因此,在 pH 值发生变化时,一些底栖动物可能会迁移至其他区域,而另一些则可能因无法适应而死亡,这进一步影响了底栖动物的物种多样性。

4 结语

4.1 结论

本研究对珠碧江河口湿地红树林退塘还林修复前期 3 年 6 个阶段的生态环境特征及物种多样性变化进行分析,结果表明半自然退塘还林是可行性强、生境破坏少、生态恢复程度良好和周期短的修复模式,而且随着退塘还林年限的增加,研究区域的水环境质量逐步得到改善。在退塘还林进程中,底栖动物和鱼类多样性呈现先降后升的趋势,退塘还林生态恢复区生态系统功能也得到了-定的恢复。根据 RDA 分析,水体温度和沉积物 pH 值与红树林物种多样性息息相关,在未来红树林生态修复中需重点监测。

4.2 建议与展望

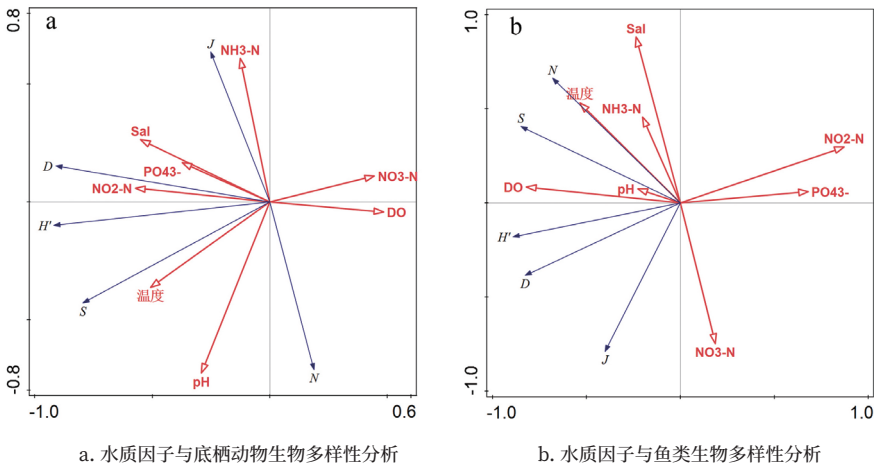
4.2.1 建议

珠碧江河口湿地经过三年半自然退塘还林修复,其红树林生态系统功能已得到了初步的恢复。在未来生态文明建设进程中,中国红树林保护和修复力度将会进一步加强。针对珠碧江退塘还林生态恢复区修复现状及存在的问题,提出若干建议:

1) 树种选择。由实地监测情况可知,红海兰、海榄雌和蜡烛果对研究区的适应性更高,可以作为该区域红树栽植的首选植物和建群种。另外,目前的生物多样性偏低,不利于生态系统服务功能的发挥,修复种植时可在遵循“适地适树”原则的基础上,适当增加红树林物种种类,有利于提升群落的物种多样性,进而提高群落的稳定性,增强红树林群落的抵抗能力^[20]。部分外来入侵种对植物生态具有破坏作用,会挤占其他植物种群的生长空间和争夺资源,可以有针对性地清除,进行幼林抚育、割草等管理。

2) 水文连通。海水浸淹时间过短或过长都会影响红树林幼苗的存活率,在退塘还林修复种植前需特别注重场地平整和潮沟疏通,最大限度地保障海水涨退潮的正常运行,才能充分保障当地红树林的健康生长,同时维护其他水生生物的适宜生存环境。

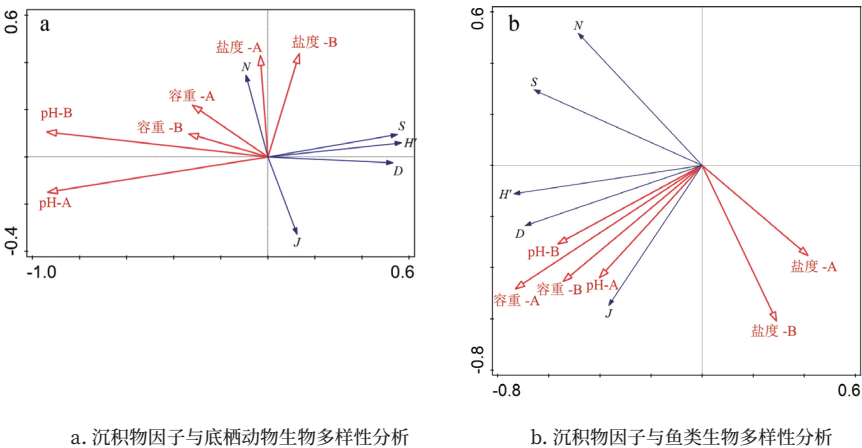
3) 生态监测。在未来红树林修复过程中,需加强对水体温度以及沉积物 pH、容重等环境因子的跟踪监测,



注:红色箭头表示水质因子,蓝色箭头表示生物指标。箭头的方向表示环境因子与排序轴间的正负相关性,而箭头的长度代表环境因子与群落分布和种类分布间相关程度的大小。

图 5 水质因子与生物因子的 Canoco-RDA 分析矢量

Fig.5 Canoco-RDA analysis vector for hydrologic and biological factors



注: A 表示土层厚度为 0~10 cm; B 表示土层厚度为 10~20 cm。红色箭头表示沉积物因子,蓝色箭头表示生物指标。

图 6 沉积物因子与生物因子的 Canoco-RDA 分析矢量

Fig.6 Canoco-RDA analysis vector for sediment factors and biological factors

以维持红树林生态系统的稳定性。

4.2.2 展望

在红树林生态环境特征和物种多样性影响分析中, 本文仅对水质因子和沉积物 pH、容重、盐度做了研究和讨论, 但对沉积物碳库有机碳组分及氮、磷、硅等营养元素在退塘还林过程中的变化并未深入探讨, 今后仍需深入研究, 以便能更加全面地了解红树林退塘还林过程中生态环境因子的变化规律。其次, 在对退塘还林过程中底栖动物、鱼类资源的分布进行监测调查时, 只在春季和秋季做了调研, 对夏季和冬季的物种组成和分布并未深入探讨, 未来还需要进一步的跟踪监测研究。

红树林修复和保护工作任重道远。相关研究表明, 完全恢复海洋和河口生态系统的动植物种类一般需要 15~25 年^[21], 退塘还林后的红树林生物量至少需要 50 年才能接近邻近的天然林水平, 而恢复其生物多样性则需要更长的时间^[22]。本研究对退塘还林修复前期的物种多样性监测具有较强的现实意义, 但对于修复中期和后期的多样性变化情况还需长时间的监测和研究。同时, 后续还需加强红树林保护的科学与管理, 以促进红树林的良性建设和可持续发展^[23]。

致谢: 感谢海南大学热带农林学院宋希强教授于论文选题和调研思路等方面的指导; 感谢海南省林业科学研究院薛杨高级工程师于数据分析、行文逻辑性、用词专业性等方面给予论文优化意见; 感谢课题组张龙洋、孙静馨、曾秀、薛乾怀、王鑫洋、张泽、杨华对本研究实验调研的帮助。

注: 文中图片均由作者自绘。

参考文献:

- [1] 林鹏. 中国红树林研究进展 [J]. 厦门大学学报 (自然科学版), 2001 (2): 592-603.
- [2] SIMARD M, FATOYINBO L, SMETANKA C, et al. Mangrove canopy height globally related to precipitation, temperature and cyclone frequency[J]. Nature Geoscience, 2019, 12 (1): 40-45.
- [3] DUKE N C, MEYNECKE J O, DITTMANN S, et al. A world without mangroves?[J]. Science (New York, N.Y.), 2007, 317 (5834): 41-42.
- [4] PRIMAVERA J H, ESTEBAN J M A. A review of mangrove rehabilitation in the Philippines: Successes, failures and future prospects[J]. Wetlands Ecology & Management, 2008, 16 (5): 345-358.
- [5] DUNCAN C, PRIMAVERA J H, PETTORELLI N, et al. Rehabilitating mangrove ecosystem services: A case study on the relative benefits of abandoned pond reversion from Panay Island, Philippines[J]. Marine Pollution Bulletin, 2016, 109 (2): 772-782.
- [6] 王文卿, 张林, 张雅棉, 等. 红树林退塘还林研究进展 [J]. 厦门大学学报 (自然科学版), 2021, 60 (2): 348-354.
- [7] 范航清, 王文卿. 中国红树林保育的若干重要问题 [J]. 厦门大学学报 (自然科学版), 2017, 56 (3): 323-330.
- [8] 田蜜, 钟才荣, 方赞山, 等. 基于多源遥感的东寨港不同模式退塘还林红树林演变分析 [J]. 湿地科学与管理, 2023, 19 (3): 4-8.
- [9] 昌江黎族自治县人民政府. 昌江概况 [EB/OL]. (2018-

10-22) [2024-04-10]. <https://changjiang.hainan.gov.cn/changjiang/0101/201810/b1a4d3f2ad61424ab37a2bf7c46d978b.shtml>.

- [10] 王瑁, 张尽函, 施富山. 海南东寨港红树林区的渔具及渔获物调查 [J]. 水产科技情报, 2007, 34 (1): 6-9.
- [11] R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing[EB/OL]. [2024-04-10]. <https://www.R-project.org/>.
- [12] 马克平, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法 I α 多样性的测度方法 (下) [J]. 生物多样性, 1994 (4): 231-239.
- [13] 周然, 彭士涛, 覃雪波, 等. 渤海湾浮游植物与环境因子关系的多元分析 [J]. 环境科学, 2013, 34 (3): 864-873.
- [14] 邹发生, 宋晓军, 陈伟, 等. 海南东寨港红树林滩涂大型底栖动物多样性的初步研究 [J]. 生物多样性, 1999 (3): 16-21.
- [15] 樊思琦, 翟方国, 刘子洲, 等. 2018 年 9 月山东半岛东北近海海水溶解氧浓度观测研究 [J]. 海洋湖沼通报, 2023, 45 (5): 142-151.
- [16] 陈永林, 孙永光, 谢炳庚, 等. 红树林湿地景观格局与近海域水质的相关分析——以广西北海地区为例 [J]. 海洋环境科学, 2016, 35 (1): 7-12.
- [17] HUMPESCH U H. Life cycle and growth rates of Baetis spp. (Ephemeroptera: Baetidae) in the laboratory and in two stony streams in Austria[J]. Freshwater Ecology, 1979, 9 (5): 467-479.
- [18] 邓吉河. 浅谈水温与鱼类的关系 [J]. 黑龙江水产, 2019 (1): 25-27.
- [19] 沙聪, 王木兰, 姜玥璐, 等. 红树林土壤 pH 和其他土壤理化性质之间的相互作用 [J]. 科学通报, 2018, 63 (26): 2745-2756.
- [20] 关开朗, 张信坚, 谭广文, 等. 深圳市红树林典型群落的物种组成及结构多样性研究 [J]. 生态科学, 2021, 40 (4): 83-91.
- [21] BORJA Á, DAUER D M, ELLIOTT M, et al. Medium and long-term recovery of estuarine and coastal ecosystems: Patterns, rates and restoration effectiveness[J]. Estuaries and Coasts, 2010, 33 (6): 1249-1260.
- [22] PRIMAVERA J H, ROLLON R N, SAMSON M S. The pressing challenges of mangrove rehabilitation: Pond reversion and coastal protection[J]. Treatise on Estuarine and Coastal Science, 2011, 10: 217-244.
- [23] 曾明. 红树林的资源分布及其效益 [J]. 广东园林, 2012, 34 (4): 58-61.

作者简介:

王媛/1999 年生 / 女 / 广西贺州人 / 硕士 / 海南大学 (海口 570100) / 专业方向为红树林生态修复研究

杜彦君/1981 年生 / 男 / 海南海口人 / 博士 / 海南大学 (海口 570100) / 研究员 / 研究方向为红树林生物多样性

钟云芳/1977 年生 / 女 / 海南海口人 / 博士 / 海南大学 (海口 570100) / 副教授 / 研究方向为园艺、生物学

(* 通信作者) 杨泽秀/1970 年生 / 男 / 海南东方人 / 本科 / 海南省珠峰林业生态研究所 (海口 570100) / 高级项目经理师、林业工程师 / 研究方向为森林资源调查、生态修复 / E-mail: 80240104@qq.com